第 37 卷第 11 期
2017 年 6 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.11
Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604200744

郝俊,陈超,王建立,杨丰,刘洪来.贵州喀斯特山区人工草地-农田景观土壤温度界面季节性变化.生态学报,2017,37(11):3816-3823.

Hao J, Chen C, Wang J L, Yang F, Liu H L.Seasonal variation of the edge influence of soil temperature on cultivated grassland-cropland boundaries in Karst areas of Guizhou Province.Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3816-3823.

贵州喀斯特山区人工草地-农田景观土壤温度界面季节性变化

郝　俊,陈　超*,王建立,杨　丰,刘洪来

贵州大学动物科学学院, 贵阳　550025

摘要: 景观界面是生态交错区的重要组成部分,在生态系统的结构、过程和功能中发挥了重要的作用。以贵州喀斯特山区人工草地-农田景观界面为研究对象,对界面表层土壤(0—20 cm)温度进行季节性监测;采用移动窗口法、野外测定和室内统计相结合,对以土壤温度为参数的界面宽度的大小进行了判定;对研究区 3 个功能区土壤温度进行比较分析。结果表明:贵州人工草地-农田景观界面四季表层土壤的平均温度分别为 9.8,26.5,15.4℃和 4.8℃;人工草地-农田景观春、夏、秋、冬四季土壤温度界面宽度随土壤温度的变化而变化,表现为由宽变窄的变化规律,分别为 37,32,27 m 和 24 m,土壤温度界面在人工草地系统的影响域变化与总界面宽度保持一致。研究区四季农田功能区系统、人工草地-农田复合功能区系统和人工草地功能区系统的平均土壤温度为 14.0,14.1℃和 13.9℃,春季、夏季和冬季研究区 3 个功能区的土壤温度均呈极显著差异,秋季农田功能区系统与人工草地-农田复合功能区系统的土壤温度差异不显著,二者与草地功能区系统差异极显著。建议对研究区采用 12—18 m 的宽度进行草田间作,为丰富界面理论及"退耕还草"工程提供理论参考和实践措施。

关键词: 土壤温度;界面宽度;人工草地-农田界面;季节变化

Seasonal variation of the edge influence of soil temperature on cultivated grassland-cropland boundaries in Karst areas of Guizhou Province

HAO Jun, CHEN Chao*, WANG Jianli, YANG Feng, LIU Honglai

College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang 550025, *China*

Abstract: The landscape boundary is a transition zone between two or more adjacent ecosystems, or an interface that exists between an organism and abiotic environment; it is also extremely sensitive to climate change and human interference, and plays an essential role in the structure, processes, and functions of ecosystems. Soil temperature affects vegetation growth, and plays an important role in environmental microclimates and plant production, and affects various chemical reactions of soil organic matter and nitrogen accumulation; therefore, it affects plant growth, seed germination, and crop output. Cultivated grassland-cropland boundaries (Maiping County, Guiyang) in Karst areas of Guizhou Province were analyzed, and the surface soil temperature (0—20 cm) of the interface was monitored seasonally. Moving-split window technology (MSWT) was used to compute the variables in adjacent samples along transect data, which was a simple and reliable method for determining the boundary, and MSWT could be used for any type of variable reaction. The width of the cultivated grassland-cropland boundary was determined based on soil temperature by combining the field measurement, indoor statistics, and MSWT in this study. The soil temperature of three functional areas in the study area was compared and

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560670,31101751);贵州省科技厅项目(黔科合 NY 字[2012]3011 号)

收稿日期: 2016-04-20;　　**网络出版日期:** 2017-02-22

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gzgyxgc3855218@163.com

analyzed. The results showed that the average annual soil temperature of the cultivated grassland-cropland boundary in Guizhou was 9.8, 26.5, 15.4, and 4.8℃ for spring, summer, autumn, and winter, respectively. The width variation of the soil temperature boundary in cultivated grassland-cropland varied with seasonal shifts and soil temperature, from wide to narrow: 37, 32, 27, and 24 m in spring, summer, autumn, and winter, respectively. This also indicated that the soil temperature-interface width in cultivated grassland systems varied consistently with the total width of the cultivated grassland-cropland boundary, which was categorized as a gradual changing boundary type. The average soil temperature of the cropland functional area, cultivated grassland-cropland compound functional area, and the grassland functional area was 14.0, 14.1, and 13.9℃, respectively, and the soil temperature of the three functional areas was significantly different in spring, summer, and winter; and the soil temperature in the grassland functional area system and cultivated grassland-cropland compound functional area were not significantly different in autumn, and the soil temperature in the farmland functional area system and cultivated grassland-cropland compound functional area were significantly different to the grassland functional area system. Based on these results, regarding the policy of "returning cropland to grassland", an optimal width of 12—18 m could be set for grassland-cropland intercropping in the studied area, and this study provides reference values for the sustainable development of southern grassland animal husbandry, and theoretical references and practical measures for enriching the boundary theory and the project of "returning cropland to grassland".

Key Words: soil temperature; boundary width; cultivated grassland-cropland boundary; seasonal variation

景观界面是指两个或两个以上相邻生态系统之间的过渡带,或存在于生物体和非生物环境之间的界面,是普遍存在于生态系统与空间尺度上的异质性过渡区域[1]。景观界面来源于 Clements 提出的生态交错带概念,随着研究的不断深入,SCOPE 对 Ecotone 概念重新进行了定义,即"相邻两个群落之间的交错区,它具有由特定的时间和空间尺度及相邻生态系统相互作用程度所确定的一系列特征",从而突出了生态系统之间的相互联系和相互作用[2]。在一定程度上,景观界面成为了生态过渡区(Ecological transition zone)与生态交错带的同义词[3]。景观界面作为一个特殊区域,具有支配性特征,同时也是一个有着特定性质、结构和功能的独立的系统,使得其对本区域的小气候变化和人类干扰极端敏感,是研究农牧交错带生态位的关键区域。

界面影响域也称为边界效应的宽度、边界效应的强度,是指某种变化穿透到栖息地内的距离,界面影响域的确定是研究界面各种生态效应的基础[4]。目前,关于生态界面影响域的研究主要集中于北方,一般针对一维数值,采用线性模型模拟、数值变量分析法、移动窗口法或分段线性回归和非线性回归法等方法进行分析判定。界面判定大多数采用生物因子和非生物因子两类指标,生物因子如主要物种组成、密度、盖度、生物量,优势种生长率、消亡率等,非生物因子包括地形、光照、风速、温度、水分等[5]。水热条件是植被生长发育过程中的重要影响因子,土壤温度不仅对环境小气候及植物产量起着重要作用[6],而且影响土壤中各种化学反应、土壤有机质和氮素累积,从而影响植物的生长、种子的萌发、农作物的产量,是相邻生态系统在生态梯度上影响指标的关键因子[7]。以前景观界面的研究往往以土壤水分为指标判定界面影响域,然而从土壤温度角度出发的研究较少[8-9],且界面研究中土壤温度的测定时间一般为夏季,在其他季节未曾有研究者做过土壤温度测定的工作,缺乏界面土壤温度在不同季节的变化情况。

贵州喀斯特山区是世界上发育最完全的喀斯特连续地带,由于其体系复杂,生态系统变异敏感度高,环境容量低,灾害承受阈值低等特征,使得喀斯特成为我国四大生态环境脆弱区之一[10]。土壤温度的季节性变化对研究喀斯特山区生态交错带的土壤活性及生态小气候监测具有重要意义。研究表层土壤温度的季节性变化有助于揭示土壤温度对贵州喀斯特地区的生态环境和生产力的影响[11]。本研究以贵州人工草地-农田景观界面为研究对象,以春、夏、秋、冬四季土壤温度为参数,分析研究区土壤温度在空间和时间上的变化特征,采用移动窗口法判定研究区人工草地-农田土壤温度景观界面影响域位置和宽度的季节动态变化,并对研究区不同功能区的土壤温度进行比较分析,为不同生态系统间物质运移研究和区域退耕还草、草田间作提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区麦坪乡(26°20′N, 106°34′E,海拔 1050 m),地势北高南低,大多为平缓耕地,属亚热带季风温润气候,水热同季但偶尔发生伏旱[12]。贵阳市气候冬暖夏凉,四季分明,2 月下旬进入春季,5 月中旬到 9 月上旬为夏季,9 月中旬开始入秋,11 月上旬之后为冬季[13]。气温变化小,年均温为 14.9℃,7 月平均气温 23.3 ℃,1 月平均气温 4.7℃,年极端最低气温-4.0℃,年积温 5400℃。年均降雨量 1102 mm,蒸发量 738 mm,集中降雨量为 6—8 月,占全年雨量的 70%,是贵州一年四季干湿最适中的区域。土壤类型为黄壤。

研究区人工草地建植于 2008 年,优势种为白三叶(*Trifolium repens*)和黑麦草(*Lolium perenne*),伴生种为鸭茅(*Dactylis glomerata*),植被盖度约 80%,利用方式为围栏放牧,放牧强度约为每公顷 7 个羊单位。研究区农田一般采用玉米(*Zea mays*)和油菜(*Blassikakapestris*)轮作,盖度约为 65%,玉米于每年 4 月播种,9 月收获,产量约 8250 kg/hm^2;油菜于每年 10 月播种,翌年 4 月收获,产量约为 2400 kg/hm^2。农田土壤耕层深度约为 15—20 cm。草地与农田交界呈直线,边界为南北走向,长度约为 500 m[14]。

1.2 试验设计与取样方法

以人工草地-农田交界处为“0”点,垂直于界面分别向草地和农田 50 m 设置 3 条样线,每条样线间隔 10 m。在每条样线上采用等距离(1 m)测定土壤温度,具体如图 1 所示,共计 300 个测量点。采用土壤温度测定仪(TZS-10,浙江托普仪器有限公司),测量时将测定仪探头插入表层土壤约 10 cm 处,2 组人员(每组 6 人)分别同时在人工草地区和农田区沿样线测定四季土壤(0—20 cm)各测量点温度,并记录数据,测量每条样线的时间大概需要 10 min。选取连续 3d 无降雨的晴朗天气(测量当天的气温接近往年当季节的平均温度)进行数据采集,测定时间分别为 2013 年 7 月 21 日,10 月 13 日,12 月 21 日和 2014 年 3 月 16 日 09:00。

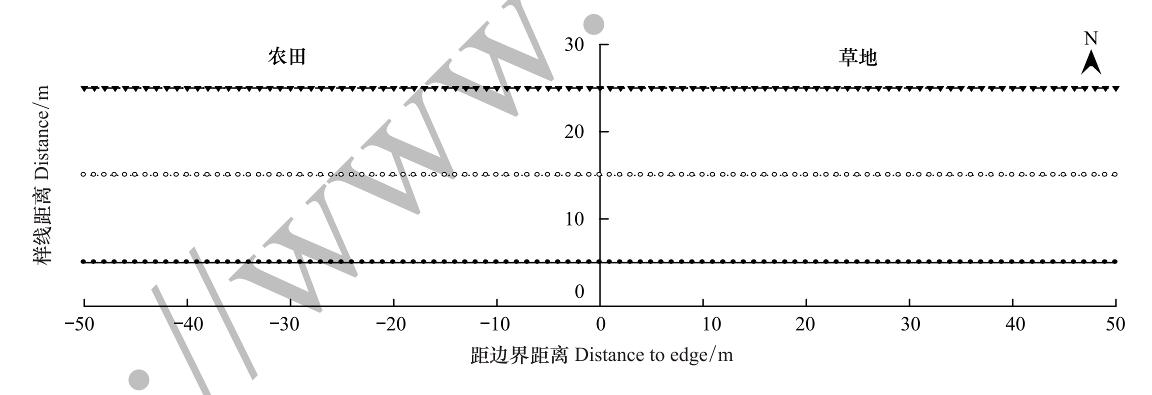


图 1 样点布设示意图

Fig.1 Sketch map of sample site

1.3 数据处理

以土壤温度为参数,取平方欧氏距离和(squared eudidean distance, SED)为相异系数,采用移动窗口法(moving split-window technique, MSWT)判定人工草地-农田土壤温度界面宽度。设置窗体平均分割为两个半窗体 a 和 b,计算 a 和 b 之间的相异系数,然后将窗体向右移动一个取样点,再计算半窗体间的相异系数,直到右半窗端点达到最后一个取样点为止。计算公式为:

$$\mathrm{SED}_n = \sum_{i=1}^{m} (\bar{x}_{iaw} - \bar{x}_{ibw})^2$$

式中,n 是两个半窗口的中点;a 和 b 分别为两个半窗口或窗口的停顿点;w 为窗口的宽度;m 是样点的变量数(m=1), $\bar{x}$ 为所测定参数的数值,即土壤温度。将相异系数系列沿取样点坐标轴作图,根据曲线的峭度和变异定量判断景观界面的类型、位置和宽度[15]。陡峭的峰值出现区就是景观界面所在的位置,峰两边明显出现

起伏的端点之间的距离（即峰宽）就是景观界面的宽度,峰宽的端点即景观界面和相邻生态系统的边界。距离函数的峰值越陡,峰宽越窄,景观界面过渡越明显;相反,峰值较低且峰宽较大。以 SED 为纵坐标,以样线距离为横坐标作图,根据图像变化判断土壤温度影响域的范围。常用的相异系数有欧氏距离、相异系数、判别分析函数和 Mahalanobis 距离和多样性函数及相异百分率等[16]。

根据界面宽度划分功能区系统,以不同功能区系统间的土壤温度和不同季节各功能区的土壤温度为参数作方差分析,比较不同功能区间及相同功能区不同季节间土壤温度的变异。

数据采用 Excel 2007 和 SPSS 11.0 软件处理,采用 SigmaPlot 10.0 软件作图;运用方差分析对比分析贵州人工草地-农田界面不同功能区土壤温度的变化。

2　结果与分析

2.1　贵州人工草地-农田界面土壤温度的季节变化

研究区人工草地-农田交错区季节间的土壤温度空间变化见图 2。由图 2 可以看出,研究区界面四季的土壤(0—20 cm)平均温度分别为 9.8,26.5,15.4℃和 4.8℃,呈现出“低-高-低”的变化趋势。人工草地生态系统和农田生态系统四季土壤温度变幅分别为 20.6℃和 22.7℃,表现为差异显著($P<0.05$)。

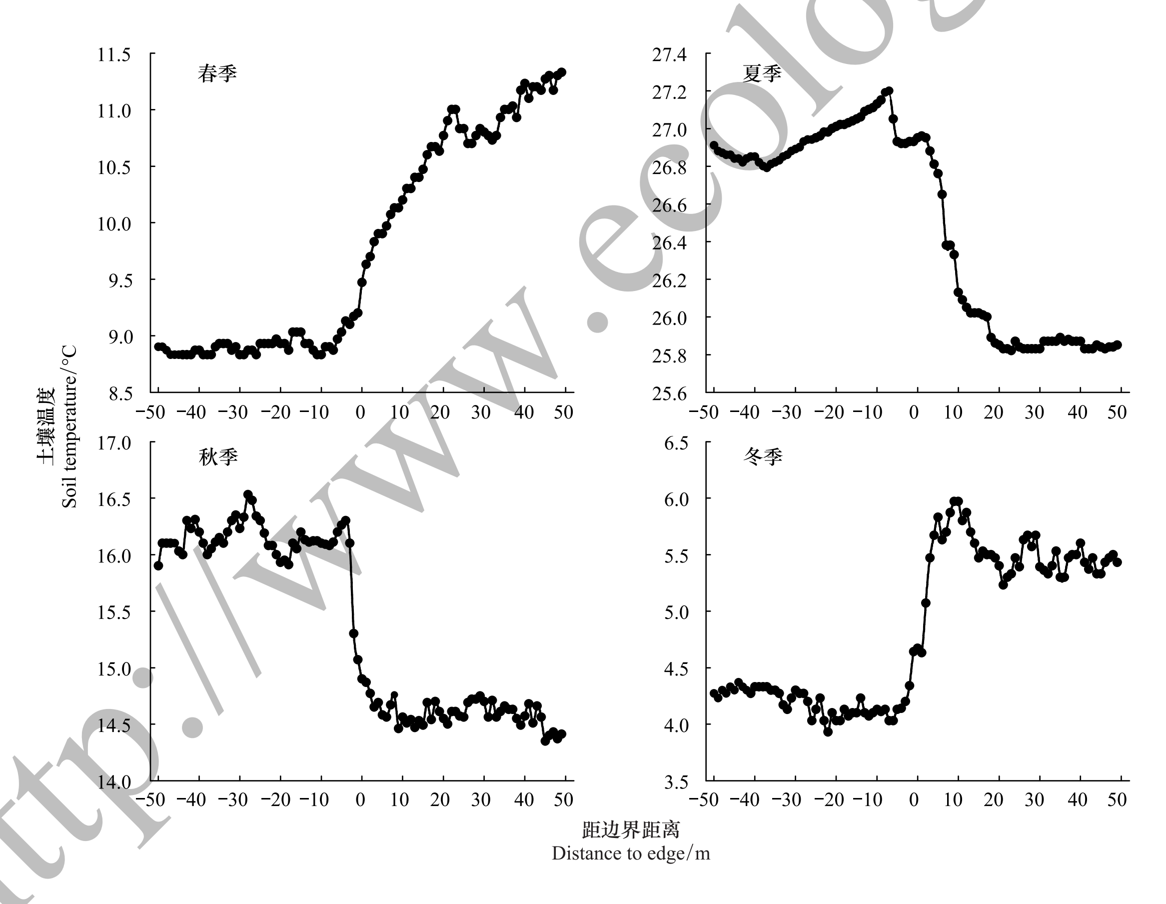


图 2　研究区人工草地-农田土壤温度空间变化

Fig.2　Spatial change of soil temperature of cultivated pasture-farmland boundary in studied area

2.2　贵州人工草地-农田界面土壤温度影响域的季节性变化

移动窗口法对定量判定界面的位置和宽度提供了一个特别有效和客观的方法[17]。本研究以土壤温度为参数,依次计算窗口为 2、4、…、28、30 时的两个半窗口间的相异系数,然后将变异系数沿取样点坐标轴作图(图 3),当曲线的变化趋势趋于平滑时可以较好地反映研究界面的影响域。

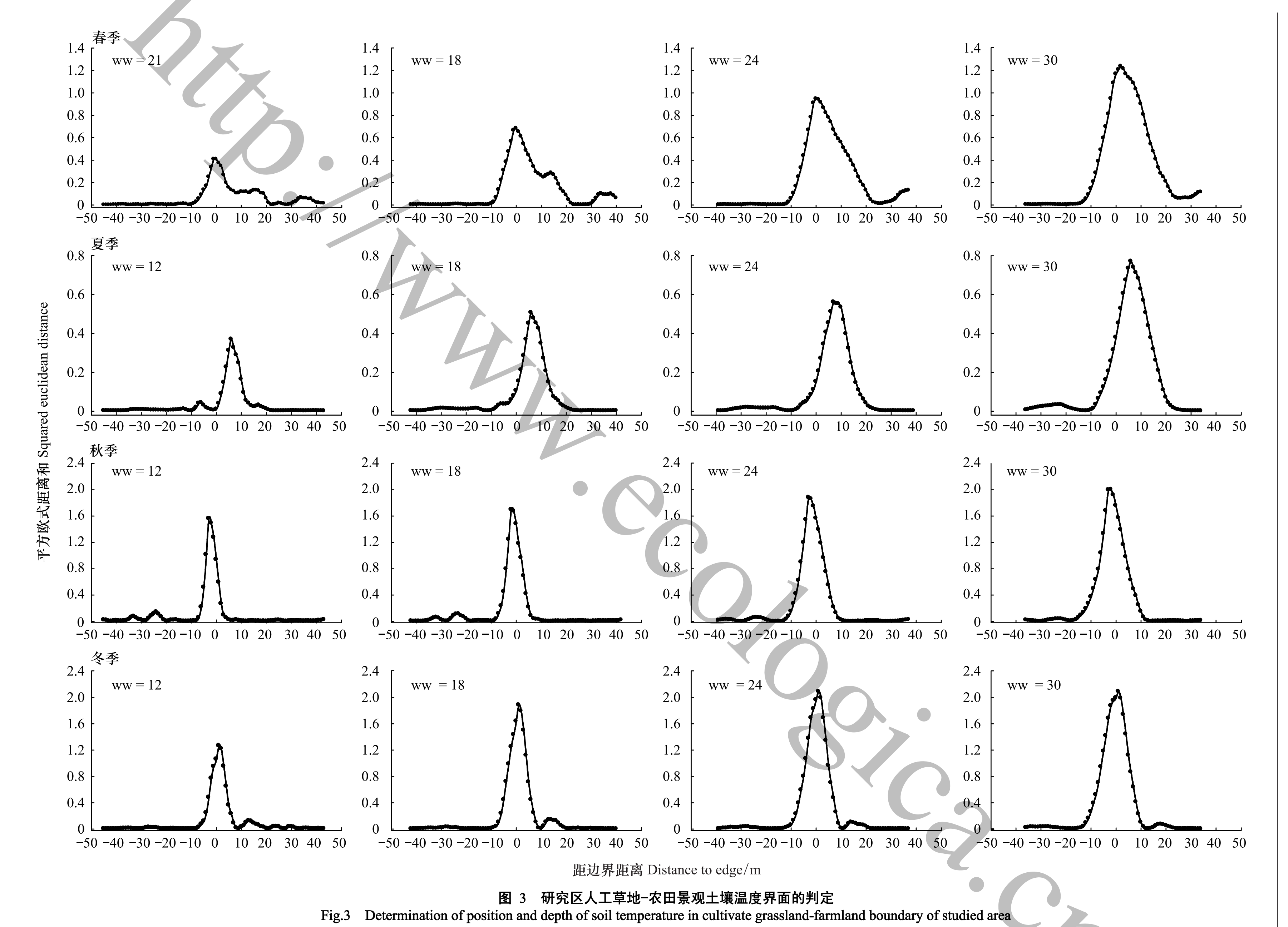


图 3 研究区人工草地-农田景观土壤温度界面的判定

Fig.3 Determination of position and depth of soil temperature in cultivate grassland-farmland boundary of studied area

由图 3 可以看出,在春季界面中,当窗口宽度大于 18 时,能够清晰的看出主峰位置,但在人工草地系统依旧存在一个小峰,继续增加窗口宽度该小峰逐渐变小;当窗口移动至 24 到 30 时曲线趋向基本平滑,此时可以判定研究区界面春季土壤温度影响宽度为人工草地 25 m,农田 12 m,总界面宽度为 37 m;同理,夏季、秋季、冬季研究区人工草地-农田界面土壤温度影响域总宽度分别为 32、27 m 和 24 m;研究区界面宽度从春季到冬季呈现出逐渐变窄的变化。研究区图像的峰宽跨度和峰值均较小,该界面属渐变类型。由此可以分别确定人工草地功能区系统、人工草地-农田复合功能区系统和农田功能区系统的范围。

2.3　贵州人工草地-农田界面不同功能区土壤温度的比较

由表 1 可知,在春季和冬季,研究区土壤温度均为人工草地功能区系统>人工草地-农田复合功能区系统>农田功能区系统,夏季和秋季研究区的土壤温度变化为农田功能区系统>人工草地-农田复合功能区系统>人工草地功能区系统。其中,春季、夏季和冬季研究区 3 个功能区系统的土壤温度均呈极显著差异,秋季研究区农田功能系统与人工草地-农田复合功能区系统的土壤温度差异不显著,但二者与人工草地功能区系统的土壤温度差异极显著。

研究区农田功能区系统、人工草地-农田复合功能区系统和人工草地功能区系统的土壤温度高低顺序依次为夏季>秋季>春季>冬季。3 个功能区系统的土壤温度变化随季节更替而改变,均呈极显著差异($P<0.05$)。研究区 3 个功能区系统的土壤温度由春季到夏季的变化最大,变幅约为 16.7℃;从夏季到秋季的土壤温度变幅约为 11.1℃,略小于前者;土壤温度在冬季到春季的变化较为缓和,变化幅度仅为 5.0℃。农田功能区系统四季土壤温度变化的差异最大,人工草地功能区系统四季土壤温度的变化的差异最小,而人工草地-农田复合区系统的土壤温度变化的差异介于二者之间。春、夏、秋、冬研究区 3 个功能区系统的土壤温度变化与月平均气温和月平均降水量的变化趋势相同。根据贵州省地方监测数据显示:2013 年 7 月,10 月,12 月和 2014 年 3 月的月平均气温分别为 12.0、24.5、16.5℃和 7.5℃;月均降水量分别为 34、179、93 mm 和 21 mm。

表 1　研究区土壤温度的变异比较

Table 1　Comparison of soil temperature in studied area

功能区系统 Functional systems	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
农田功能区系统 Cropland functional system	8.86±0.42Cc	26.93±0.29Aa	16.21±0.29Ab	4.23±0.02Cd
人工草地-农田复合功能区系统 Cultivated grassland-cropland compound functional system	9.31±0.58Bc	26.52±0.48Ba	15.23±0.52Ab	4.73±0.03Bd
人工草地功能区系统 Cultivated grassland functional system	10.91±0.59Ac	25.85±0.32Ca	13.69±0.53Bb	5.29±0.01Ad

表中不同字母代表 5%水平下差异显著,大写字母为相同季节不同功能区之间比较;小写字母为不同季节相同功能区之间比较

3　讨论

3.1　贵州人工草地-农田土壤温度的空间变化

由图 2 可知,在人工草地-农田复合功能区系统,土壤温度的变化幅度大,而在人工草地功能区与农田功能区系统内土壤温度的变化起伏较平缓。3 个功能区系统的土壤温度出现差异可能是由于以下几个原因:(1)微生物群落不同,农田功能区系统由于长期耕作导致其土壤中的微生物群落发生变化,土壤表层中的真菌、放线菌等微生物的数量高于草地生态系统[18],微生物活动释放出的热量有助于土壤温度的提高;(2)植被覆盖度不同,人工草地功能区、人工草地-农田复合功能区和农田功能区的盖度分别为 80%,70%和 65%,研究区的植被覆盖度对土壤呼吸速率有一定影响[19],付芝红[20]等人指出不同地表覆盖类型的土壤呼吸速率和土壤温度呈指数相关关系,且李涛[21]等人的研究表明不同覆盖类型的土壤呼吸速率在变化上也存在差异。不同功能区系统的土壤温度差异也可能影响土壤水分和植被密度,从而形成功能区小气候;(3)土壤水分含量不同,在人工草地开垦为农田后,其土壤持水力降低而导致农田功能区系统的土壤平均含水量低于草地功能

区系统,而土壤含水量具有明显调节温度的作用[22],所以农田土壤温度的变化比草地功能区系统剧烈。研究区土壤质量含水量在一年四季表现为“高-低-高”的变化趋势,春季、夏季和秋季、冬季分别为土壤水分的贮存期、消耗期、恢复期[23]。与此次研究结果比较,在土壤水分贮存期和恢复期,即土壤含水量较多的条件下,随着土壤质量含水量的增加,土壤温度降低,土壤地表植被覆盖的影响不明显,则人工草地功能区系统的土壤温度相对较高,该结果与王兆伟等的研究结果一致[24]。在土壤水分消耗期,袁淑杰[25]等人指出昼夜温差大,草地功能区土壤地表植被的遮阴效应明显降低,导致该功能区的土壤温度相对农田功能区系统和复合人工草地-农田功能区系统较低。

3.2 贵州人工草地-农田土壤温度界面影响域变化

研究区人工草地-农田界面土壤温度的变化比在邻近草地或农田内的变化大,这说明在人工草地-农田界面的土壤温度变化和邻近农田或草地内部的变化是不同的。在 Cadenasso 等人的研究中对于生态界面效应的相关描述分为 3 种:正效应、负效应和过渡型[26],王红梅[27]等认为发生突然的正、负效应变化可能是邻近斑块作用的结果。本研究中的土壤温度在界面的变化为过渡型。

人工草地功能区系统与农田功能区系统和人工草地-农田功能区系统的土壤温度相比较稳定,土壤温度在界面影响域变化较为剧烈,该结果与韩晓等人的研究结果一致[28],说明土壤温度的变化受气温的季节变化及降雨量的影响;研究区人工草地-农田景观土壤温度界面宽度在不同季节存在差异,春、夏、秋、冬四季温度界面总宽度分别为 37,32,27,24 m,变化规律为由宽逐渐变窄,说明贵州人工草地-农田景观土壤温度界面宽度随着季节变化而发生动态变化。综合一年四季来看,研究区温度界面总宽度在农田 25 m 至人工草地 15 m 之间,该结果与 Kapos[29]在美国太平洋西北林地的研究结果有差异,这可能与气候类型,地形及土壤颗粒等因素有关。

3.3 界面影响域的判定

在秋、冬两季曲线的主峰在人工草地-农田景观交界处“0”点附近,春、夏两季曲线的主峰位置在人工草地位置上,由此不能准确判定研究区土壤温度界面位置是否与景观界面重合,仍需要进一步研究。目前界面宽度的研究集中于单季节、单因素判定,例如采用植被数量指标判断不同景观界面宽度时,在农田功能区系统无法测得相对准确的数据,为达到提高农作物产量的目的,农田中的一些杂草等在人为干预或田间管理时被移除,将导致植物多样性无法准确统计和计算[30]。林长存[31]等人指出,通过地面小气候(如温度、水分、风速等)虽然可以确定界面宽度,但受到的干扰比较强烈,经常会出现双峰现象,难以得到平滑曲线。而在单一季节判定景观界面宽度可能受到环境因素影响,具有一定局限性,Pockman[32]等的研究表明在半干旱地区的雨季和旱季,草原-灌丛生态系统内各功能区之间土壤水分的分布有很大差异,因此其水分影响域在雨季和旱季也可能存在明显的区别。

本研究在春夏秋冬四个季节分别对贵州人工草地-农田土壤温度界面进行宽度判定,界面宽度的动态判定分析与一般界面判定相比能够反映并解释界面宽度变化的原因和机制,从而确定人工草地-农田土壤温度界面的准确范围。在界面研究中,界面宽度判定同样受多种因素的影响及制约,考虑进行双因素或多因素耦合判定界面宽度,使生态界面宽度的判定更为精确,以期丰富界面理论。

4 结论

贵州人工草地-农田土壤温度界面宽度随土壤温度的变化而变化,春季到冬季表现为由宽变窄的变化规律,界面总宽度在 24—37 m 之间,土壤温度界面在人工草地系统的影响域变化与总界面宽度保持一致。

基于人工草地生态系统和农田生态系统之间存在人工草地-农田复合功能区,建议今后景观界面在进行退耕还草过程中采用“草田间作”措施,采用 12—18 m(农田退耕)草地,12—18 m 农田(半幅界面宽度)条状间作,可达到利用草地和农田土壤的温度和含水量进行优势互补的目的。

参考文献(References):

[1] 肖笃宁,李秀珍. 景观生态学的学科前沿与发展战略. 生态学报, 2003, 23(8): 1615-1621.
[2] Hansen A J, di Castri F. 1992, Landscape Boundaries. New York: Springer-Verlag,.
[3] 王庆锁,王襄平,罗菊春,冯宗炜,李经天,马玉华,苏玉华. 生态交错带与生物多样性. 生物多样性, 1997, 5(2): 126-131.
[4] Li L G, He X Y, Li X Z, Wen Q C, He H S. Depth of edge influence of the agricultural-forest landscape boundary, Southwestern China. Ecological Research, 2007, 22(5): 774-783.
[5] 傅尧,刘利,林长存. 华北农牧交错带农田-草地景观土壤速效氮界面研究. 草地学报, 2014, 22(6): 1222-1226.
[6] Hu G J, Zhao L, Wu X D, Li R, Wu T H, Xie C W, Qiao Y P, Shi J Z, Cheng G D. An analytical model for estimating soil temperature profiles on the Qinghai-Tibet Plateau of China. Journal of Arid Land, 2016, 8(2): 232-240.
[7] 王红梅,王堃,米佳,谢应忠. 华北农牧交错带农田-草地界面土壤水分的空间特征. 应用生态学报, 2010, 21(3): 604-612.
[8] 刘苏峡,莫兴国,李俊,刘伟东. 土壤水分及土壤-大气界面对麦田水热传输的作用. 地理研究, 1999, 18(1): 24-30.
[9] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性. 云南地理环境研究, 1990, 2(1): 21-29.
[10] 程建峰,潘晓云,刘宜柏. 土壤条件对陆稻根系生长的影响. 土壤学报, 2002, 39(4): 590-598.
[11] 张慧智,史学正,于东升,王洪杰,赵永存,孙维侠,黄宝荣. 中国土壤温度的空间预测研究. 土壤学报, 2009, 46(1): 1-8.
[12] 魏嵬,刘方,向仰州. 贵阳市花溪麦坪煤矿废弃地植被调查与分析. 贵州大学学报: 自然科学版, 2009, 26(2): 132-135.
[13] 张东海,白慧,周文钰,龙俐. 气候季节划分标准在贵州地区的适用性分析. 高原山地气象研究, 2014, 34(4): 77-82.
[14] 李非里,刘丛强,杨元根,闭向阳,刘杰. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系中重金属的迁移特征. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 52-56.
[15] Ludwig J A, Cornelius J M. Locating discontinuities along ecological gradients. Ecology, 1987, 68(2): 448-450.
[16] Chen J Q, Franklin J F, Spies T A. Vegetation responses to edge environments in old-growth Douglas-fir forests. Ecological Applications, 1992, 2(4): 387-396.
[17] 塔娜,五十六,马文娟,陈斌,朱英开. 不同含水率下日光温室土壤温度变化规律的峰拟合法拟合. 农业工程学报, 2014, 30(20): 204-210.
[18] 张慧智,史学正,于东升,王洪杰,赵永存,孙维侠,黄宝荣. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究. 土壤学报, 2009, 46(2): 227-234.
[19] Song Y T, Zhou D W, Zhang H X, Li G D, Jin Y H, Li Q. Effects of vegetation height and density on soil temperature variations. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 907-912.
[20] 付芝红,呼延佼奇,李锋,宋英石,赵丹,李慧. 城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响. 生态学报, 2013, 33(18): 5500-5508.
[21] 李涛,潘志华,安萍莉,妥德宝,赵沛义. 北方农牧交错带(武川县)土壤微生物数量分布及层化比率研究. 水土保持学报, 2006, 20(1): 99-102.
[22] 冯雨峰,刘洪来,吕进英,董向前,宋建农,王堃. 原地放垡振动间隔松土对羊草草地质量的影响. 农业机械学报, 2010, 41(8): 43-47, 66-66.
[23] 王建立,刘洪来,杨丰,唐文汉,程巍. 贵州人工草地—农田景观土壤水分界面研究. 草地学报, 2015, 23(4): 697-702.
[24] 王兆伟,郝卫平,龚道枝,梅旭荣,王春堂. 秸秆覆盖量对农田土壤水分和温度动态的影响. 中国农业气象, 2010, 31(2): 244-250.
[25] 袁淑杰,谷晓平,缪启龙,邱新法,康为民,王福增. 基于DEM的复杂地形下平均气温分布式模拟研究——以贵州高原为例. 自然资源学报, 2010, 25(5): 859-867.
[26] Cadenasso M L, Traynor M M, Pickett S T A. Functional location of forest edges: gradients of multiple physical factors. Canadian Journal of Forest Research, 1997, 27(5): 774-782.
[27] 王红梅,王堃,米佳,叶上游,赵娜. 北方农牧交错带沽源农田-草地界面土壤水热空间特征. 生态学报, 2009, 29(12): 6589-6599.
[28] 韩晓. 巴丹吉林沙漠腹地土壤温度观测及其变化特征. 兰州: 兰州大学, 2013.
[29] Kapos V. Effects of isolation on the water status of forest patches in the Brazilian Amazon. Journal of Tropical Ecology, 1989, 5(2): 173-185.
[30] 李丽光,何兴元,李秀珍. 景观边界影响域研究进展. 应用生态学报, 2006, 17(5): 935-938.
[31] 林长存,王德利,曹勇宏,杨允菲,祝廷成. 农林交错带界面的小气候边界影响域季节动态. 生态学杂志, 2008, 27(11): 1932-1936.
[32] Pockman W T, Small E E. The influence of spatial patterns of soil moisture on the grass and shrub responses to a summer rainstorm in a Chihuahuan desert ecotone. Ecosystems, 2010, 13(4): 511-525.